

Die maximal tragbare Radlast – eine zweckmässige Kenngrösse für die Praxis

Andreas Chervet¹, Wolfgang G. Sturny¹, Samuel Gut², Marlies Sommer², Matthias Stettler³, Peter Weisskopf² und Thomas Keller²

¹Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern, Fachstelle Bodenschutz, 3052 Zollikofen, Schweiz

²Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH, 8046 Zürich, Schweiz

³Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, 3052 Zollikofen, Schweiz.

Auskünfte: Thomas Keller, E-Mail: thomas.keller@agroscope.admin.ch



Abb. 1 | Dauerbeobachtungsfläche Oberacker, Inforama Rütli, Zollikofen im Jahr 2004. (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope).

Einleitung

Die heute in der Landwirtschaft eingesetzten Zugfahrzeuge und Maschinen sind schwer, schlagkräftig und auch bei feuchten Bodenverhältnissen hochmobil. Bei Bodenbeanspruchungen mit hohen Befahrungssintensitäten und grossen Radlasten besteht daher ein hohes Verdichtungsrisiko. Als Indikator für die Bodenfestigkeit und damit den mechanischen Widerstand des Bodens gegenüber einer Verdichtung wird die Vorbelastung verwendet (Horn und Fleige 2003). Eine Verformung der Bodenstruktur ist überwiegend elastisch und reversibel,

solange der durch einen Reifen übertragene vertikale Druck¹ kleiner als die Vorbelastung bleibt. Ist der vertikale Druck hingegen grösser als die Vorbelastung, reagiert der Boden plastisch, d. h. es kommt zu einer dauerhaften Verformung der Bodenstruktur und damit zu einer Verdichtung.

Obwohl Böden oberflächennah über ein hohes Regenerationspotenzial verfügen, sind die Folgen von Oberbodenverdichtungen nicht zu vernachlässigen: Selbst in Anbausystemen mit wendender Bodenbearbeitung ist bei Oberbodenverdichtungen eine Erholungszeit von mehreren Jahren erforderlich (Arvidsson und Håkansson 1996; Weisskopf et al. 2010); in Anbausystemen mit reduzierter Bodenbearbeitung können Oberbodenverdichtungen ein noch gravierenderes Problem darstellen (Schjønning und Thomsen 2013).

¹In Anlehnung an die Umgangssprache verwenden wir in diesem Artikel den Ausdruck «Druck». Der korrekte Ausdruck wäre jedoch «Spannung».

Um das Risiko von Unterbodenverdichtungen abzuschätzen, wurde in der Vollzugshilfe «Bodenschutz in der Landwirtschaft» (BAFU und BLW 2013) eine Bodentiefe von 35 cm als Referenztiefe festgelegt. Berisso *et al.* (2012) und Schjønning *et al.* (2013) zeigten auf, dass Verdichtungen im Unterboden länger als zehn Jahre bestehen bleiben können. Während dieser Zeit kann es zu massiven Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen und der ökologischen Leistungen des Bodens kommen, zu eingeschränktem Wurzel- und Pflanzenwachstum und folglich zu Ertragsverlusten (Soane und van Ouwerkerk 1994).

Wird das Verdichtungsrisiko auf der Referenztiefe von 35 cm geprüft, bedeutet dies nicht, dass für tiefer gelegene Schichten kein solches Risiko mehr besteht. Insbesondere Maschinen mit hohen Radlasten übertragen grosse vertikale Bodendrücke bedeutend tiefer (Schjønning *et al.* 2012). Das Vermeiden von Unterbodenverdichtungen ist eine sehr effiziente Massnahme zur nachhaltigen Bodenbewirtschaftung: Es soll sorgsam darauf geachtet werden, dass der vertikale Bodendruck die Bodenfestigkeit im Unterboden (hier in 35 cm Tiefe) nicht übersteigt. Diese Forderung führt zum Begriff «maximal tragbare Radlast» (siehe Kasten).

Material und Methoden

Standort, Tensiometermessnetz und Probenahmen

Sowohl die *In-situ*-Messungen des Matrixpotenziales als auch die Probenahmen für die Vorbelastungsmessungen erfolgten auf der Dauerbeobachtungsfläche Oberacker am Inforama Rütli in Zollikofen bei Bern (Abb. 1). Angelegt wurde dieser Demonstrationsversuch 1994 auf einem schwach humosen, sandigen Lehmboden (18% Ton, 23% Schluff), der als Braunerde (Eutric Cambisol) klassifiziert ist (WRB 2006). Der Standort liegt auf 557 m ü. M. und weist eine mittlere jährliche Lufttemperatur von 9,3°C sowie eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von 1109 mm auf. Auf sechs 18 m breiten Parzellen (durch 3 m breite Dauergrünlandstreifen abgegrenzt) werden in einem Streifenversuch mit sechs verschiedenen Kulturen die beiden Anbausysteme Direktsaat (DS) und Pflug (PF) auf je 9 m breiten Teilparzellen miteinander verglichen. Bei PF wurde bis 2002 konventionell rund 25 cm tief gepflügt und ab 2003 ein *On-Land*-Pflug eingesetzt (ab 2006 nur noch rund 15 cm tief). Bei DS werden die Kulturen ohne vorangehende Bodenlockerung gesät. Mittels Scheibenscharen wird lediglich ein Sächslitz im Boden geöffnet und nach der Saatgutablage geschlossen. Seit 2007 wird folgende Fruchtfolge angebaut: Eiweisserbsen – Winterweizen – Ackerbohnen

Zusammenfassung ■ Hohe Radlasten führen vor allem in Unterböden zu Druckbelastungen, die dauerhafte Verformungen und damit Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen und der Ertragsfähigkeit verursachen. Die maximal tragbare Radlast ist jene Radlast, bei der die Bodenbelastung gerade noch unterhalb der Bodenfestigkeit (bestimmt als Vorbelastung) liegt und die Bodenstruktur deshalb noch nicht dauerhaft verformt wird. Wir berechneten die saisonalen Veränderungen der maximal tragbaren Radlast für die beiden Anbausysteme Direktsaat und Pflug sowie für den Dauergrünlandstreifen zwischen den Versuchspartellen der Dauerbeobachtungsfläche Oberacker (sandiger Lehm). Gemessen wurde die Bodenfeuchtigkeit (als Matrixpotenzial) *in situ* und die Vorbelastung bei verschiedenen Matrixpotenzialen an ungestörten Zylinderproben im Labor. Die Simulationen wurden für eine Referenztiefe von 35 cm sowohl für Standardreifen als auch für Niederdruckreifen durchgeführt. Es zeigte sich, dass sowohl die Vorbelastung als auch die maximal tragbare Radlast stark von der Bodenfeuchtigkeit abhängig sind. Bei Niederdruckreifen ist die maximal tragbare Radlast höher als bei Standardreifen. Die Anzahl Tage, an denen der Boden ohne Verdichtungsrisiko befahren werden kann, schwankt stark von Jahr zu Jahr, ist beim Pflugsystem leicht höher als beim Direktsaatsystem und nimmt mit steigender Radlast ab. Die Darstellung des Verdichtungsrisikos mit dem Parameter «maximal tragbare Radlast» ist einfach zu interpretieren und deshalb nützlich für die Prävention von Bodenverdichtungen.

– Wintergerste – Zuckerrüben – Silomais. Bodenbearbeitung, Saat, Pflege und Ernte werden mit kommerziellen Maschinen von Lohnunternehmern ausgeführt.

Der Oberacker ist seit 2001 ein Standort des kantonalen Tensiometer-Messnetzes. Installiert sind die Tensiometer in fünffacher Wiederholung in den Anbausystemen DS und PF (jeweils bei Winterweizen) und in einem Dauergrünlandstreifen in 35 cm Bodentiefe. Die Daten werden von März bis Oktober drei Mal wöchentlich und von November bis Februar einmal pro Woche erfasst und liefern quasi-kontinuierliche Angaben zum zeitlichen

Verlauf des Matrixpotenziales (h). Von den *In-situ*-Messungen der Tensiometer-Messnetzstation wurden die Medianwerte der Jahre 2001 bis 2011 verwendet.

Im Frühjahr 2013 wurden in DS und PF ungestörte Zylinderproben (Höhe: 60 mm, Durchmesser: 100 mm) aus der Bodentiefe 35–41 cm entnommen. Die Beprobung 19 Jahre nach Versuchsbeginn erfolgte auf drei der sechs Parzellen ungefähr ein halbes Jahr nach der letzten Bodenbearbeitung bei PF. Ergänzt wurden die Probenahmen mit Referenzproben aus zwei zwischen den Versuchspartellen liegenden Dauergrünlandstreifen (DG).

Laboranalysen

Im Labor wurden die Zylinderproben (je neun Proben pro Anbausystem und Bodenfeuchtestufe) mit Wasser gesättigt und schrittweise über fünf verschiedene Matrixpotenziale auf folgende Feuchtestufen entwässert: -30 hPa (pF 1,5; wobei $pF = \log[-\text{Matrixpotenzial}]$), -60 hPa (pF 1,8), -100 hPa (pF 2,0), -200 hPa (pF 2,3) und -500 hPa (pF 2,7). Anschliessend wurden die Proben im uniaxialen Kompressionsversuch in 30-minütigen Belastungsintervallen bei 15 verschiedenen Druckstufen mit den Vertikaldrücken 20 kPa, 30 kPa, 40 kPa, 50 kPa, 60 kPa, 80 kPa, 100 kPa, 125 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 250 kPa, 400 kPa, 600 kPa, 800 kPa und 970 kPa belastet. Nach jeder Druckstufe wurde die Verformung gemessen.

Der Wert der Vorbelastung wurde für jede Bodenprobe aus der halblogarithmischen Drucksetzungskurve berechnet, d.h. aus der gemessenen Verformung als Funktion des Vertikaldruckes, und beim Schnittpunkt der Erstbelastungsgeraden mit der logarithmischen Druckachse (x-Achse) bei einer Verformung von Null bestimmt (Dias Junior und Pierce 1995; McBride und Joosse 1996). Danach wurde empirisch die Beziehung zwischen der Vorbelastung und der Bodenfeuchte (als Matrixpotenzial) für beide Anbausysteme und den Dauergrünlandstreifen hergestellt. Die Vorbelastung als Funktion der Zeit wurde aus der Kombination der bodenfeuchteabhängigen Vorbelastung mit den *in situ* per Tensiometer im Jahresverlauf gemessenen Matrixpotenzialen hergeleitet (vgl. Kasten, Schritte 3–4).

Beurteilen des Verdichtungsrisikos

Für Maschinen, die bei üblichen Feldarbeiten in der Praxis oft eingesetzt werden, wurden typische Radlasten bestimmt (Tab. 1). Obschon die Einsatzgewichte während der Feldarbeit oft entweder abnehmen (z.B. Güllefass) oder zunehmen (z.B. Mähdrescher), wurde angenommen, dass die Radlast konstant bleibt. Die maximal tragbare Radlast in Abhängigkeit vom gemessenen Matrixpotenzial wurde für alle Reifen berechnet (vgl. Kasten) und mit den typischen Radlasten verglichen. Solange die

Kasten | Die maximal tragbare Radlast wird in fünf Schritten bestimmt:

- 1) *Vertikaler Bodendruck in 35 cm Tiefe:* Der vertikale Bodendruck in Abhängigkeit der Radlast wurde mit dem *SoilFlex*-Modell simuliert (Keller et al. 2007). *SoilFlex* arbeitet auf der Grundlage semianalytischer Lösungen für die Druckausbreitungsberechnung im Boden. Wir verwendeten einen Konzentrationsfaktor (Fröhlich 1934) von 5 (Keller und Arvidsson 2004). Die Druckverteilung in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Boden ist abhängig von der Radlast, den Merkmalen des gewählten Reifentyps und seinem Innendruck und wurde nach Keller (2005) berechnet. Für jeden Reifen erfolgten die Simulationen für verschiedene Radlasten, wobei der Reifennendruck immer dem von den Reifenherstellern empfohlenen Reifendruck entsprach. Aus diesen Simulationen konnte eine Beziehung zwischen Radlast und dem vertikalen Bodendruck in 35 cm Bodentiefe bestimmt werden.
- 2) *Vertikaler Bodendruck und Vorbelastung:* Für die maximal tragbare Radlast gilt:
 - a) vertikaler Bodendruck \leq Vorbelastung und
 - b) Radlast (bei vertikalem Bodendruck = Vorbelastung) = maximal tragbare Radlast.
 Zusammen mit Schritt 1 erhalten wir die maximal tragbare Radlast als Funktion der Vorbelastung.
- 3) *Vorbelastung und Bodenfeuchtigkeit:* Die Vorbelastung als Funktion des Matrixpotenzials wurde im Labor mit Hilfe des uniaxialen Kompressionsversuches bestimmt.
- 4) *Bodenfeuchtigkeit im Jahresverlauf:* Das Matrixpotenzial wurde *in situ* im Jahresverlauf gemessen, woraus sich der zeitliche Verlauf des Matrixpotenzials ergab.
- 5) *Maximal tragbare Radlast im Jahresverlauf:* Aus den Schritten 1–4 ergibt sich die maximal tragbare Radlast als Funktion der Zeit.

Tab. 1 | Maschinen und Geräte mit typischen (standardisierten) Radlasten für den praktischen Feldeinsatz.

Fall	Zugfahrzeug/Maschine	Radlast (Tonnen)
1	a	Traktor (100 kW)
	b	Traktor (100 kW) mit <i>On-Land</i> -Pflug
2	a	Traktor (170 kW)
	b	Traktor (170 kW) mit Tiefgrubber
3	a	Güllefass 12 m ³ , Tandemachse
	b	Güllefass 8 m ³ , einachsige
4	a	Mähdrescher (mit 4,5 m Mähbalken)
	b	Mähdrescher (mit 6 m Mähbalken)
5	a	Selbstfahrender Feldhäcksler
	b	Selbstfahrender sechsstufiger Zuckerrübensammler

kW = Kilowatt (1 kW = 1,4 PS)

Radlast kleiner ist als die maximal tragbare Radlast, kann der Boden ohne Verdichtungsrisiko befahren werden. Die Anzahl Tage, an denen diese Bedingung im Verlaufe eines Jahres erfüllt ist, wird als «Anzahl verfügbare Befahrungstage» bezeichnet.

Resultate

Einfluss der Bodenfeuchte

Beim Vergleich zwischen DS und PF weist das in einer Tiefe von 35 cm *in situ* in den Weizenbeständen gemessene und über die Jahre 2001–2011 gemittelte Matrixpotenzial ähnliche Verläufe auf; von Mai bis Juli ist dies mit dem hohen Wasserverbrauch des wachsenden Winterweizens zu begründen (Abb. 2). Im Gegensatz dazu war der Unterboden bei den regelmässig gemulchten Dauergrünlandstreifen von Mai bis Juli feuchter, im August (nach der bei DS und PF erfolgten Weizenernte) dagegen trockener. Der jährliche Verlauf des Matrixpotenziales widerspiegelt sich auch in der saisonalen Entwicklung der maximal tragbaren Radlast (Abb. 3): Während im niederschlagsreichen Jahr 2001 (Niederschlagssumme: 1329 mm) die maximale tragbare Radlast stark schwankte und nur kurzzeitig höhere Werte als 5 t erreichte, war der Boden im niederschlagsarmen Jahr 2003 (Niederschlagssumme: 745 mm) zwischen Anfang Mai bis Ende September durchgehend mit hohen Radlasten befahrbar. Die maximale tragbare Radlast wird folglich sowohl vom Wasserbedarf der angebauten Kultur als auch durch die Niederschlagsmenge und -verteilung stark beeinflusst.

Einfluss des Anbausystems

Die in Abbildung 4 dargestellten Unterschiede bei der maximal tragbaren Radlast zwischen DS und PF lassen sich in erster Linie mit der unterschiedlichen Vorbelastung in Abhängigkeit des Matrixpotenzialverlaufs erklären (Kasten, Schritt 3), diejenigen zwischen DS und DG hauptsächlich mit dem unterschiedlichen Verlauf des Matrixpotenziales (Kasten, Schritt 4) und diejenigen zwischen PF und DG sowohl mit der unterschiedlichen Vorbelastung als auch mit dem unterschiedlichen Matrixpotenzialverlauf selbst. Insbesondere in den trockenen Sommermonaten mit stark negativen Matrixpotenzialwerten führten die bei PF hohen Vorbelastungswerte auch zu hohen Werten für die maximal tragbare Radlast (bis über 2 t Differenz im Vergleich zu DS und DG).

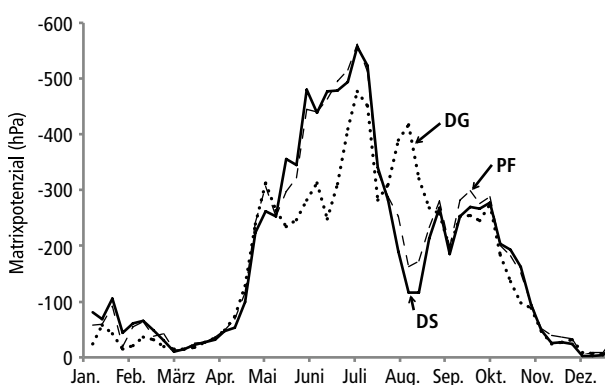


Abb. 2 | Das in 35 cm Bodentiefe *in situ* gemessene und für die Jahre 2001 bis 2011 gemittelte Matrixpotenzial der Dauergrünlandstreifen (DG = gepunktete Linie) und der Anbausysteme Direktsaat (DS = durchgezogene Linie) und Pflug (PF = gestrichelte Linie).

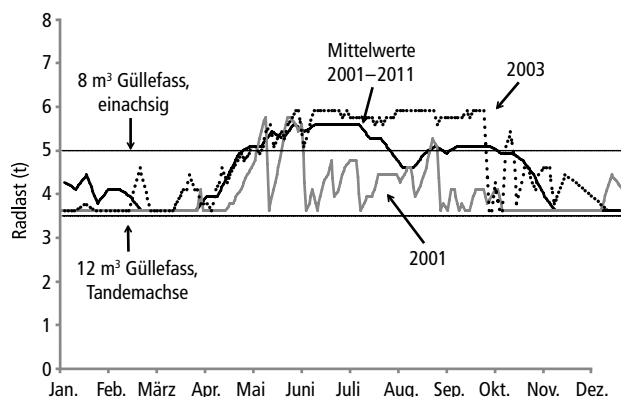


Abb. 3 | Die maximal tragbaren Radlasten im niederschlagsreichen Jahr 2001 (graue durchgezogene Linie), im Trockenjahr 2003 (schwarze gepunktete Linie) und für die Jahre 2001 bis 2011 gemittelt (schwarze durchgezogene Linie). Die Simulation bezieht sich auf das Anbausystem Direktsaat und den Niederdruckreifen 750/60R30.5 (Tab. 2, Bsp. 3). Entsprechend den Beispielen 3a bzw. 3b in Tabelle 1 stehen die beiden durchgezogenen horizontalen Linien für die Radlasten eines einachsigen Güllefasses mit 8 m³ Inhalt (Linie bei 5 t) bzw. mit Tandemachse und 12 m³ Inhalt (Linie bei 3,5 t).

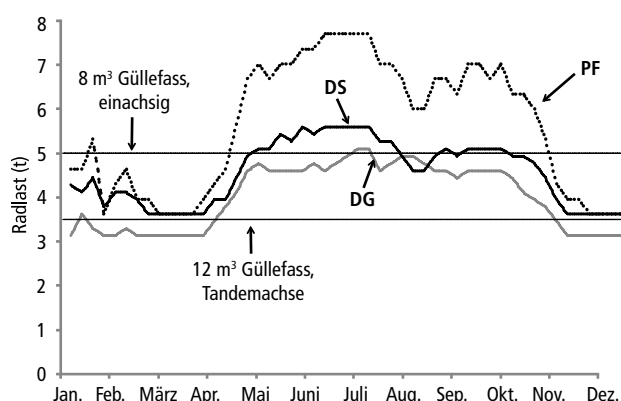


Abb. 4 | Die für die Jahre 2001 bis 2011 gemittelten maximal tragbaren Radlasten des Dauergrünlandstreifens (DG = graue durchgezogene Linie) und der beiden Anbausysteme Direktsaat (DS = schwarze durchgezogene Linie) und Pflug (PF = schwarze gepunktete Linie). Die Simulation bezieht sich auf den Niederdruckreifen 750/60R30.5 (Tab. 2, Bsp. 3). Entsprechend den Beispielen 3a bzw. 3b in Tabelle 1 stehen die beiden durchgezogenen horizontalen Linien für die Radlasten eines einachsigen Güllefasses mit 8 m³ Inhalt (Linie bei 5 t) bzw. mit Tandemachse und 12 m³ Inhalt (Linie bei 3,5 t).

Einfluss von Reifen und Radlast

Der Einsatz eines einachsigen, mit Standardreifen ausgerüsteten Güllefasses (8 m³ Inhalt) ist im DS-Verfahren mit einem hohen Verdichtungsrisiko verbunden, da die Radlast für diesen Anhänger 5 t beträgt (durchgezogene horizontale Linie bei 5 t), die maximal tragbare Radlast jedoch immer kleiner als 5 t ist (graue durch-

gezogene Linie in Abb. 5). Dasselbe Güllefass, aber mit Niederdruckreifen ausgerüstet, erreicht dagegen für die maximal tragbare Radlast durchgehend höhere Werte (schwarze durchgezogene Linie). Von Mai bis Juli sind sie sogar – bezogen auf das Verdichtungsrisiko – in einem günstigen Bereich von über 5 t. Wird nun das mit Niederdruckreifen ausgerüstete Güllefass mit einem für Strassentransporte üblichen Reifennennendruck eingesetzt (entsprechend den Herstellerangaben für eine Fahrgeschwindigkeit von 40 km h⁻¹), reduziert sich die maximal tragbare Radlast wieder (schwarze gepunktete Linie). Wenn die Gesamtlast des Güllefasses um 4 auf 12 m³ Inhalt erhöht und das höhere Gewicht auf eine mit Niederdruckreifen ausgerüstete Tandem-Achse abgestützt wird, verlängert sich die risikoarme Befahrungsperiode massiv, weil die einzelne Radlast des Güllefasses nur noch 3,5 t beträgt (gestrichelte Linie bei 3,5 t).

Tiefe Radlasten und korrekt gepumpte Niederdruckreifen verlängern bei Feldeinsätzen die risikoarmen Perioden mit geringem Verdichtungsrisiko, d. h. erhöhen die Anzahl verfügbarer Befahrungstage. Dies ist nicht nur in niederschlagsreichen Jahren ein entscheidender Vorteil: Die maximal tragbare Radlast für ein mit Standardreifen ausgerüstetes Güllefasses mit 8 m³ Inhalt blieb selbst im Trockenjahr 2003 immer im Risikobereich von unter 5 t (nicht dargestellt).

Anzahl verfügbarer Befahrungstage

Obwohl die meisten Zugfahrzeuge und Maschinen in Tabelle 1 in der Praxis nur in ganz bestimmten saisonalen Zeiträumen eingesetzt werden, wurde die in Tabelle 3 aufgeführte Anzahl verfügbarer Befahrungstage zu Vergleichszwecken für eine von März bis November dauernde 275-tägige Periode berechnet (für die beiden Anbausysteme DS und PF sowie für DG, jeweils für Standard- und Niederdruckreifen).

Mit steigenden Radlasten nimmt die Anzahl verfügbarer Befahrungstage ab, bei Radlasten über 5 t überproportional stark. Beim Mähdrrescher (Fall 4b) und beim selbstfahrenden Maishäcksler (Fall 5a) bleibt die Anzahl Befahrungstage über die ganze 275-tägige Periode hinweg bei DS und PF klein. Überhaupt keine verfügbaren Befahrungstage wurden für den selbstfahrenden Zuckerrübensvollernter (Fall 5b) festgestellt. Im Vergleich zu den Standardreifen ergaben die Niederdruckreifen eine grössere Anzahl verfügbarer Befahrungstage, was die Verdichtungsrisiko mindernde Bedeutung dieses Reifentyps unterstreicht.

Beim Vergleich zwischen den Anbausystemen war die Anzahl verfügbarer Befahrungstage bei PF grösser als bei DS, und bei DS wiederum grösser als bei DG. Weil

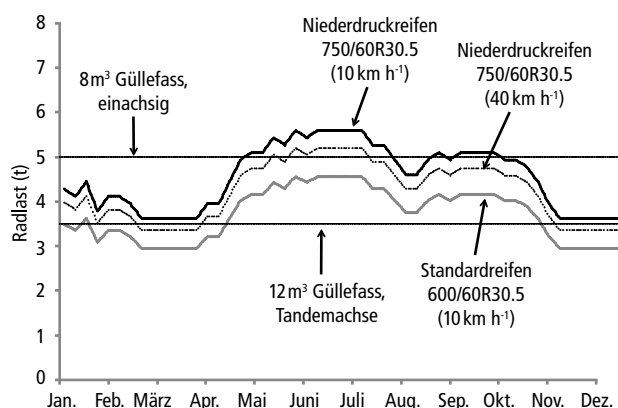


Abb. 5 | Die beim Anbausystem Direktsaat für die Jahre 2001 bis 2011 gemittelten maximal tragbaren Radlasten des Standardreifens 600/60R30.5 (graue durchgezogene Linie) und des Niederdruckreifens 750/60R30.5 (Tab. 2, Bsp. 3). Beim Niederdruckreifen erfolgte die Simulation bei den Fahrgeschwindigkeiten 10 km h⁻¹ (schwarze durchgezogene Linie) bzw. 40 km h⁻¹ (schwarze gepunktete Linie), jeweils mit dem vom Hersteller empfohlenen Reifeninnendruck. Entsprechend dem Beispiel 3a bzw. 3b in Tabelle 1 stehen die beiden durchgezogenen horizontalen Linien für die Radlasten eines einachsigen Güllfasses mit 8 m³ Inhalt (Linie bei 5t) bzw. eines Güllfasses mit Tandemachse und 12 m³ Inhalt (Linie bei 3,5t).

der Vorbelastungswert in trockenen Böden bei PF grösser ist als bei DS und DG, liegt die maximal tragbare Radlast bei eher trockenen Bedingungen bei PF höher als bei DS und DG (siehe Absatz «Einfluss des Anbausystems»), was bei PF und Radlasten von über 5t (z. B. einachsiges 8 m³-Güllfass) auch zu mehr verfügbaren Befahrungstagen führte.

Tab. 2 | Ausgewählte Reifen der in Tabelle 1 aufgeführten Maschinen und Geräte mit Dimension und Eigenschaften.

Reifentyp	Fall	Dimension	Breite (mm)	Ø Reifen (mm)	Ø Felgen (mm)
Standard	1	460/85R38	495	1750	965
	2	520/85R42	539	1945	1067
	3	600/60R30.5	639	1496	775
	4	520/85R42	539	1945	1067
	5	800/65R32	799	1840	813
Niederdruck	1	650/60R38	677	1735	965
	2	900/50R42	853	1947	1067
	3	750/60R30.5	760	1680	775
	4	900/60R32	863	1894	813
	5	1050/50R32	1055	1858	813

Diskussion

Die Bodenfeuchte (bestimmt als Matrixpotenzial) übt einen entscheidenden Einfluss auf das Ausmass der maximal tragbaren Radlast aus. Die maximal tragbare Radlast zeigt einen ähnlichen saisonalen Verlauf wie das *in situ* gemessene Matrixpotenzial: Ausserhalb der Vegetationsperiode (November bis März) und in niederschlagsreichen Jahren ist die maximal tragbare Radlast tief, bei hohem Wasserbedarf der Kulturen und in niederschlagsarmen Jahren hingegen hoch. Dies widerspiegelt sich auch in der Anzahl verfügbarer Befahrungstage, die in nassen Jahren ebenfalls kleiner ist als in trockenen (nicht dargestellt).

Der Einfluss der Bereifung wurde aufgezeigt: Im Vergleich zu den Standardreifen wird das Verdichtungsrisiko mit Niederdruckreifen reduziert. Weil das Matrixpotenzial einen grösseren Einfluss auf die maximal tragbare Radlast ausübt als die Reifendimension, sind insbesondere bei nassen Bedingungen die Unterschiede zwischen den Niederdruck- und den Standardreifen nicht sehr ausgeprägt, und bei Radlasten über 5t ist das Bodenverdichtungsrisiko auch mit Niederdruckreifen beträchtlich.

Die Simulationen wurden für einen Reifeninnendruck durchgeführt, der den Fahrgeschwindigkeiten bei Feldeinsätzen angepasst ist (10 km h⁻¹). Für Strassenfahrten empfehlen die Hersteller für Fahrgeschwindigkeiten von 40 km h⁻¹ einen höheren Reifeninnendruck. Folgt einer Strassenfahrt ein Feldeinsatz ohne die erforderliche Druckregulierung, reduziert der (zu) hoch eingestellte Reifeninnendruck die maximal tragbare Radlast. Vor (und nach) jedem Feldeinsatz sollte der Reifeninnen-

Tab. 3 | Die berechnete Anzahl verfügbarer Befahrungstage in den Jahren 2001 bis 2011 für die von März bis November dauernde 275-tägige Zeitperiode, gemittelt in Abhängigkeit des Anbausystems. Aufgeführt sind die in Tabelle 1 und 2 abgebildeten Maschinen und Geräte bzw. Reifen.

Fall	Zugfahrzeug/Maschine	DS		PF		DG		
		ST	ND	ST	ND	ST	ND	
1	a	Traktor (100 kW)	271	275	261	266	252	275
	b	Traktor (100 kW) mit <i>On-Land</i> -Pflug	192	219	210	240	152	196
2	a	Traktor (170 kW)	232	275	248	262	212	260
	b	Traktor (170 kW) mit Tiefgrubber	58	205	198	224	0	181
3	a	Güllefass 12 m ³ , Tandemachse	201	236	218	248	176	216
	b	Güllefass 8 m ³ , einachsige	0	133	173	203	0	12
4	a	Mähdrescher (mit 4,5 m Mähbalken)	0	182	188	208	0	94
	b	Mähdrescher (mit 6 m Mähbalken)	0	0	0	148	0	0
5	a	Selbstfahrender Feldhäcksler	0	128	191	203	0	12
	b	Selbstfahrender sechsstufiger Zuckerrübenvollerter	0	0	0	0	0	0

DS = Direktsaat, PF = Pflug, DG = Dauergrünlandstreifen, ST = Standardreifen, ND = Niederdruckreifen, kW = Kilowatt

druck deshalb den Einsatzbedingungen entsprechend angepasst werden können (z. B. mit zentralen Reifen-druckregelsystemen).

Weil bei standardisierten Vorbelastungswerten und bei Verdichtungsrisikokarten der dynamische Einfluss des Matrixpotenziales nicht berücksichtigt wird, ermöglicht die simulierte und anhand von Grafiken beziehungsweise Tabellen dargestellte maximal tragbare Radlast realitätsnähere Abschätzungen des Verdichtungsrisikos beziehungsweise der noch möglichen Massnahmen; diese Ergebnisse sind zudem in der Praxis einfacher zu verstehen als Vorbelastungswerte oder standardisierte Kartenwerke zum Verdichtungsrisiko. Der dynamische Ansatz der maximal tragbaren Radlast liefert sowohl in Bezug auf Radlasten, Reifentyp und Reifeninnendruck als auch hinsichtlich der berechneten Anzahl verfügbarer Befahrungstage zusätzliche Informationen zum Bodenverdichtungsrisiko in bestimmten Zeitabschnitten und davon abgeleitet über den optimalen Einsatzzeitpunkt von landwirtschaftlichen Maschinen und Geräten.

Schlussfolgerungen

Werden *In-situ*-Messungen des Matrixpotenziales, Labor-messungen der Vorbelastung bei verschiedenen Matrixpotenzialen sowie Simulationen des vertikalen Bodendruckes kombiniert, kann die saisonale Entwicklung des Verdichtungsrisikos mit Hilfe des Parameters «maximal tragbare Radlast» dargestellt werden. Das Matrixpotenzial lässt sich *in situ* einfach und kostengünstig mit Ten-

siometern erfassen. Entsprechend der Entwicklung des Matrixpotenziales schwankt die maximal tragbare Radlast im Jahresverlauf über einen weiten Bereich, wobei sie bei nassem Bodenzustand tief, bei trockenem Bodenzustand dagegen hoch ist. Die maximal tragbare Radlast wird auch von der Wechselwirkung zwischen dem Vorbelastungswert und der Bodenfeuchte beeinflusst. Diese Wechselwirkung ist bei den Anbausystemen DS und PF unterschiedlich, bei DS und DG hingegen ähnlich.

Der Vergleich von Standard- und Niederdruckreifen zeigt die Bedeutung von Niederdruckreifen bei der Prävention von Unterbodenverdichtungen auf. Bei Maschinen und Geräten mit Radlasten über 5t können jedoch auch mit Niederdruckreifen nur noch wenige oder gar keine verfügbaren Befahrungstage mehr gewonnen werden. Damit die Anzahl verfügbarer Befahrungstage erhöht und das Risiko von Unterbodenverdichtungen verringert werden kann, sind anstehende Feldeinsätze mit möglichst kleinen Radlasten und Niederdruckreifen mit optimalem Innendruck empfehlenswert. Bei Radlastbeschränkungen wie im Förderprogramm Boden des Kantons Bern (bei Güllefässern) oder im Hinblick auf das Vermeiden von Bodenverdichtungen bei nachhaltiger Bodenbewirtschaftung (vgl. Vollzugshilfe Bodenschutz in der Landwirtschaft) kann den Bodenbewirtschaftenden und -bewirtschaftern in der Praxis mit dem Parameter «maximal tragbare Radlast» eine einfach zu interpretierende und operativ zweckmässige Kenngrösse angeboten werden. ■

Riassunto**Il carico massimo sopportabile dalla ruota – un indicatore utile per la pratica**

Gli elevati carichi delle ruote determinano, soprattutto nel sottosuolo, compressioni che causano continue deformazioni e quindi danni alle funzioni e alla resa del suolo. Il carico massimo sopportabile dalla ruota consiste nel carico della ruota che in caso di sfruttamento del suolo si trova appena al di sotto della stabilità del suolo (fissato come precarico) e la struttura del suolo pertanto non è ancora costantemente deformata.

Abbiamo calcolato i cambiamenti stagionali del carico massimo sopportabile dalla ruota per i due sistemi di coltivazione con semina diretta e con aratro nonché per le strisce di superficie perennemente inerbita tra le particelle di sperimentazione della superficie di osservazione permanente (argilla sabbiosa). Sono stati misurati l'umidità del suolo (come potenziale matriciale) *in situ* e la tara per i diversi potenziali matriciali nei campioni di suolo indisturbati in laboratorio. Le simulazioni sono state condotte per una profondità di riferimento di 35 cm sia per gli pneumatici standard sia per quelli a bassa pressione. È risultato che sia il precarico sia il carico massimo sopportabile dalla ruota sono strettamente connessi all'umidità del suolo. Per gli pneumatici a bassa pressione il carico massimo sopportabile è maggiore rispetto a quelli standard. Il numero di giorni in cui il suolo può essere percorso senza rischio di compattazione subisce grandi oscillazioni annuali; nel sistema con aratro è leggermente maggiore rispetto al sistema di semina diretta ed è diminuito all'aumentare del carico della ruota. La rappresentazione del rischio di compattazione mediante il parametro «carico massimo sopportabile dalla ruota» è facilmente interpretabile e pertanto utile per la prevenzione della compattazione del suolo.

Summary**Wheel load-carrying capacity – a useful parameter for practice**

Compaction in the subsoil caused by high wheel loads is usually long-lasting, adversely affecting soil functions and productivity. Wheel load-carrying capacity is defined as the maximum wheel load for a specific tyre and inflation pressure that does not result in soil stress in excess of soil strength (defined as precompression stress).

We calculated the seasonal dynamics in wheel load-carrying capacity for different tyres (standard and low-pressure tyres) and for soil under different tillage and cropping systems (mouldboard ploughing, no till, and permanent grassland in the Oberacker long-term field experiment on a sandy loam soil). Wheel load-carrying capacity was estimated based on *in situ* measurements of soil matric potential, measurements of precompression stress at various matric potentials, and simulations of soil stress. Calculations were made for a reference depth of 35 cm. Our results show wheel load-carrying capacity to be strongly dependent on soil moisture, and to be higher for low-pressure tyres than for standard tyres. The number of trafficable days – estimated by comparing actual wheel loads of agricultural machinery with the wheel load-carrying capacity – varied between years, and decreased with increasing wheel load of the machinery. Wheel load-carrying capacity is a useful and easily interpreted parameter for portraying compaction risk, and is therefore an effective guide for preventing soil compaction.

Key words: soil compaction, precompression stress, trafficability, soil matric potential, no-tillage, mouldboard ploughing.

Literatur

- Das Literaturverzeichnis ist bei den Autoren erhältlich.